

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Исследование радиационных потерь на токамаке КТМ

УДК 533.95-046.55-044.63:621.039.62

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Дуйсен А.Ж.		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Янин С.Н.	д.ф-м.н.		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник лаборатории «Экспериментальной физики токамаков»	Садыков А.Д.			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Кашук И.В.	к.т.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООТД	Сечин А.А.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Заведующий кафедрой-руководитель научно-образовательного центра на правах кафедры, НОЦ Б.П. Вейнберга	Кривобоков В.П.	д.ф-м.н., профессор		

Томск – 2020 г.

**Результаты обучения магистров
направления 16.04.01 «Техническая физика»
(профиль «Пучковые и плазменные технологии»)**

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Р1	Демонстрировать и использовать теоретические и практические знания фундаментальных и прикладных наук, составляющих основу современной технической физики, вскрывать физическую сущность проблем, возникающих при проектировании и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-2, ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 1). CDIO Syllabus (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012
Р2	Профессионально эксплуатировать современное научное и технологическое оборудование и приборы в процессе создания и реализации радиационных и плазменных технологий.	Требования ФГОС (ОПК-1). СУОС ТПУ (УК 2, УК 3). CDIO Syllabus (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
Р3	Заниматься научно-исследовательской деятельностью в различных отраслях технической физики, связанных с современными радиационными и пучковоплазменными технологиями, критически анализировать современные проблемы, ставить задачи и разрабатывать программу исследований, выбирать адекватные методы решения задач, интерпретировать, представлять и применять полученные результаты.	Требования ФГОС (ОПК-5, ОПК-7, ПК-5, ПК- 8). СУОС ТПУ (УК 1). CDIO Syllabus (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
Р4	Самостоятельно выполнять физико-технические научные исследования для прогнозирования результатов воздействия различных радиационных и плазменных потоков на вещество, а также оптимизации параметров радиационных и пучковоплазменных технологий, с использованием современных физико-математических методов, стандартных и специально разработанных инструментальных и программных средств.	Требования ФГОС (ОПК-6, ПК-6, 7). СУОС ТПУ (УК 6). CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 2.3, 2.4), Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
Р5	Разрабатывать и оптимизировать современные пучковые и плазменные технологии с учётом экономических и экологических требований, проводить наладку и испытания технологических установок и аналитического оборудования, решать прикладные инженерно-технические и техникоэкономические задачи с помощью пакетов прикладных программ.	Требования ФГОС (ПК-12,13,14). СУОС ТПУ (УК 6). CDIO Syllabus (4.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1., 1.2, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035, 29.008
Р6	Участвовать в проектно-конструкторской деятельности, формулировать технические задания, составлять техническую документацию, разрабатывать и использовать средства автоматизации, анализировать варианты проектных, конструкторских и технологических решений, разрабатывать проекты и проектную документацию для создания оборудования, реализующего пучковые и плазменные технологии.	Требования ФГОС (ПК-15, 16). СУОС ТПУ (УК 2, УК3). Критерий 5 АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Р7	Заниматься научно-педагогической деятельностью в области технической физики, участвовать в разработке программ учебных дисциплин, проводить учебные занятия, обеспечивать практическую и научноисследовательскую работу обучающихся, применять и разрабатывать новые образовательные технологии	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 11). СУОС ТПУ (УК 1, УК3, УК5). CDIO Syllabus (4.7). Критерий 5 АИОР (п. 2.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI . Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
Р8	Владеть приёмами и методами работы с персоналом, находить оптимальные решения при реализации технологий и создании продукции, управлять программами освоения новой продукции и технологий.	Требования ФГОС (ОПК-3). СУОС ТПУ (УК 1, УК3). CDIO Syllabus (4.7). Критерий 5 (п. 2.4) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 01.004
Р9	Анализировать и систематизировать научнотехническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области радиационных и пучковоплазменных технологий, внедрять новые наукоёмкие технологии, готовить документы по защите интеллектуальной собственности, разрабатывать планы и программы организации инновационной деятельности, осуществлять технико-экономическое обоснование инновационных проектов.	Требования ФГОС (ПК-5). СУОС ТПУ (УК 1, УК2). CDIO Syllabus (2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.4, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011, 26.012, 25.035
Р10	Развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, в течение всей жизни самостоятельно обучаться новым методам исследований, пополнять свои знания в области современной технической физики и смежных наук, расширять и углублять своё научное мировоззрение.	СУОС ТПУ (УК 6). Критерий 5 (п. 2.6) АИОР, согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р11	Активно общаться в научной, производственной и социально-общественной сферах деятельности, свободно и грамотно пользоваться русским и иностранными языками как средством делового общения.	Требования ФГОС (ОПК - 7). СУОС ТПУ (УК4, УК5). CDIO Syllabus (2.4, 3.3). Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
Р12	Участвовать в организации научно-исследовательских и научно-производственных работ, проявлять инициативу, брать на себя всю полноту ответственности, уметь находить творческие, нестандартные решения профессиональных и социальных задач.	Требования ФГОС (ОПК,3 ОПК-4). СУОС ТПУ (УК 3). CDIO Syllabus (2.1, 2.2, 2.3, 2.4). Критерий 5 АИОР (п. 1.1, 1.2, 1.3, 1.5, 1.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI. Профессиональный стандарт 40.011.

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки 16.04.01 Техническая физика
 Отделение школы (НОЦ) Научно-образовательный центр Б.П. Вейнберга

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ Кривобоков В.П.
 (Подпись) (Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации
(магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы

Тема работы:

Исследование радиационных потерь на токамаке КТМ	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	52-46/с от 21.02.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	18.10.2020 г.
--	---------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования являются радиационные потери высокотемпературной плазмы на установке токамак КТМ.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ литературных источников по методам исследования и измерения радиационных потерь; раздел «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»; раздел «Социальная ответственность».</p>
<p>Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация диссертации в Power Point.</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i></p>	

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович
Раздел на иностранном языке	Утятина Янина Викторовна
Название разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
1. Изучение радиационных потерь на токамаках. 2. Диагностика радиационных потерь на токамаке КТМ.	
Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	21.02.2020 г.

Задание выдал руководитель/консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П. Вейнберга	Янин С.Н.	д.ф-м.н.		
Начальник лаборатории «Экспериментальной физики токамаков»	Садыков А.Д.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Дуйсен А.Ж.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСООБЪЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы

Школа	ИЯТШ	Отделение школы (НОЦ)	Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием филиала ИАЭ РГП НЯЦ РК
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления во внебюджетные фонды 20 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. <i>Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования.
3. <i>Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	Расчет бюджетной стоимости НИ по разработке стенда
4. <i>Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности НИ
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Бюджет НИ
5. Основные показатели эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

21.02.2020 г.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук Ирина Вадимовна	к.т.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы

Школа	ИЯТШ	Отделение (НОЦ)	Б.П. Вейнберга
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	16.04.01 Техническая физика

Тема ВКР:

Исследование радиационных потерь на токамаке КТМ	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Высокотемпературная плазма, радиационные потери плазмы, пироэлектрический болометр.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018) - СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно- вычислительным машинам и организации работы.
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: - отклонение показателей микроклимата; - превышение уровня шума; - повышенный уровень электромагнитного излучения; - недостаточная освещенность рабочей зоны; - психофизиологические; - поражение электрическим током.
3. Экологическая безопасность:	- анализ влияния объекта и процесса исследования на окружающую среду; - меры по защите окружающей среды.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	- анализ наиболее типичной ЧС: пожар в рабочем помещении; - превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	21.02.2020 г.
--	---------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Сечин Андрей Александрович	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 91 с., 33 рис., 20 табл., 27 источников, 1 приложение на английском языке.

Ключевые слова: радиационные потери, управляемый термоядерный синтез, диагностика высокотемпературной плазмы, пироэлектрический болометр, токамак.

Объектом исследования являются радиационные потери высокотемпературной плазмы на установке токамак КТМ.

Актуальность работы: Эффективность работы плазменных установок с магнитным удержанием во многом определяется температурой плазменного шнура. Однако, при повышении температуры резко возрастает радиационное излучение, для которого плазма токамака является практически прозрачной. Это излучение покидает плазму, поэтому не способствует её разогреву.

Доля лучистой энергии, поступающей в область дивертора и передней стенки, может составлять десятки процентов от мощности, затрачиваемой на разогрев плазмы.

В этой связи возникает задача измерения мощности радиационных потерь плазмы в токамаке.

Цель работы – исследование явления радиационных потерь на токамаке КТМ.

В процессе исследования были проведены экспериментальные пуски на токамаке КТМ. Была произведена калибровка пироэлектрического болометра в лабораторных условиях. Разработан алгоритм для вычисления мощности радиационных потерь.

В работе представлены результаты экспериментальных работ на токамаке КТМ. Расчет и анализ экспериментальных работ.

Область применения: диагностика радиационных потерь токамака КТМ.

Научные положения, выносимые на защиту: пирозлектрический болометр, используемый на токамаке КТМ, является эффективным устройством для измерения радиационных потерь высокотемпературной плазмы.

Оглавление

Определения	13
Обозначения и сокращения.....	14
Введение.....	15
Глава 1. Изучение радиационных потерь плазмы на токамаках.....	17
1.1 Влияние радиационных потерь на удержание плазменного шнура	18
1.2. Измерение радиационных потерь.....	19
Глава 2. Диагностика радиационных потерь на токамаке КТМ	22
2.1 AXUV-диагностика.....	22
2.2 Пироэлектрический болометр.....	24
2.3 Алгоритм расчета экспериментальных данных с пироболометра.....	26
Глава 3. Экспериментальные исследования плазмы Токамака КТМ	28
3.1 Калибровка пироэлектрического болометра.....	28
3.2 Проверка работоспособности пироэлектрического болометра	31
3.3 Плазменный разряд №3488	33
3.4 Плазменный разряд №3490	37
3.5 Плазменный разряд №3669	40
Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	44
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения.....	45
4.1.1 Анализ конкурентных технических решений	45
4.1.2 SWOT-анализ.....	47
4.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	48
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	48

4.2.2	Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения	49
4.3	Бюджет научно-технического исследования	53
4.3.1	Расчет материальных затрат НТИ	53
4.3.2	Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ	54
4.4	Основная заработная плата исполнителей темы	54
4.4.1	Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	56
4.5	Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	56
4.6	Накладные расходы.....	56
4.7	Расчет бюджетной стоимости.....	57
4.8	Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования.....	57
	Выводы по разделу.....	60
	Глава 5. Социальная ответственность.....	61
5.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	61
5.1.1	Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства	61
5.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя	63
5.2	Производственная безопасность.....	64
5.2.1	Анализ вредных и опасных факторов	64
5.2.2.1	Отклонение показателей микроклимата.....	65
5.2.2.2	Недостаточная освещенность рабочей зоны	66
5.2.2.3	Повышенный уровень шума	67
5.2.2.4	Повышенный уровень электромагнитного излучения	67
5.2.2.5	Психофизиологические факторы	68

5.2.2.6 Поражение электрическим током.....	68
5.2.2.7 Пожаробезопасность на рабочем месте	69
5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов	70
5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ	70
5.2.3.2 Микроклимат	70
5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны	70
5.2.3.4 Повышенный уровень шума	71
5.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ).....	71
5.2.3.6 Психофизиологические факторы	71
5.2.3.7 Поражение электрическим током.....	72
5.2.3.8 Пожаробезопасность на рабочем месте	73
5.3 Экологическая безопасность.....	73
5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду	73
5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду	73
5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды	74
5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	74
5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований	75
5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС	75
Выводы	76
Заключение	77
Список использованной литературы.....	78
ПРИЛОЖЕНИЕ А	81

Определения

Плазма – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов и заряженных частиц (ионов и электронов).

Термоядерная реакция – разновидность ядерной реакции, при которой лёгкие атомные ядра объединяются в более тяжёлые за счёт кинетической энергии их теплового движения.

Токамак – тороидальная установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого синтеза.

Диагностика плазмы – определение значений параметров плазмы, характеризующих её состояние.

Радиационные потери плазмы – потери энергии плазмы, за счет её излучения, обусловленная наличием примесей многозарядных ионов в высокотемпературной плазме.

Пироэлектрический болометр – прибор для измерений энергии излучения плазмы, основанный на принципе пироэлектричества.

Обозначения и сокращения

КТМ – казахстанский токамак материаловедческий

ИТЭР – интернациональный термоядерный экспериментальный реактор

AXUV – absolute extreme ultra violet

ФПУ – фотоприемное устройство

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

Пироболометр – пирозлектрический болометр

ЧЭ – чувствительный элемент

Введение

Токамак КТМ – установка, предназначенная для получения высокотемпературной плазмы. Основной целью создания токамака КТМ является проведение экспериментальных исследований и испытаний материалов и конструкционных решений защиты первой стенки термоядерного реактора [1].

Основные параметры токамака: тороидальное магнитное поле – 1 Т, номинальный ток плазмы – 0.75 МА, длительность тока плазмы 4-5 с. Большой радиус плазмы $R=0.9$ м, малый радиус плазмы $a=0.45$ м, аспектное отношение A равно 2, вертикальная вытянутость плазменного шнура равна 1.7 [2]. Объем вакуумной камеры токамака КТМ составляет 13 м³, конструкция вакуумной камеры представляет собой цельносварную конструкцию из нержавеющей стали, которая оснащена 20 патрубками для использования диагностических комплексов и введения дополнительного нагрева от внешних источников.

Нагрев плазмы на токамаке КТМ происходит за счёт омических процессов [3]. Омический нагрев наиболее прост по технической реализации и физическим принципам. Кроме того, к 2023 году планируется запустить ВЧ-генераторы, которые будут использоваться в качестве дополнительных источников нагрева плазмы.

Токамак КТМ обладает следующим основным набором диагностических комплексов, присущих современным токамакам, включающим в себя:

- видеокамеру для наблюдения и контроля геометрии плазменного шнура;
- магнитные зонды и пояса Роговского для измерений тока в плазме;
- HaDa для наблюдения спектра водорода;
- спектрометр для наблюдения спектров излучения примесей;
- SXR-детектор для регистрации жесткого рентгеновского излучения;

- AXUV-детектор и пирозлектрический болометр для измерения радиационных потерь высокотемпературной плазмы;
- многоканальный бессбойный интерферометр (МБИ), бесперебойный монитор среднехордовой плотности (БМСП), перестраиваемый импульсный радар-рефлектометр (ПИРР) для наблюдения и контроля плотности плазменного шнура.

Глава 1. Изучение радиационных потерь плазмы на токамаках

Управляемый термоядерный синтез – процесс слияния двух легких ядер в одну более тяжелую, с выделением энергии. Основным отличием от традиционной ядерной энергетики является использование реакции синтеза. Термоядерная энергетика имеет немало преимуществ, среди которых – отсутствие выработки радиоактивных веществ, угрожающих ядерной безопасности, сравнительно малая активация конструкций. Для осуществления процесса управляемого термоядерного синтеза необходимо выполнить 2 обязательных условия:

- высокая относительная скорость сталкивающихся частиц, соответствующая температуре плазмы $T > 10^8$ К;
- соблюдение критерия Лоусона $n \cdot \tau > 10^{20}$ м⁻³·с, где n – концентрация плазмы, а τ – время её удержания.

Для реализации реакции ядерного синтеза наиболее перспективным устройством является токамак, задача которого состоит в осуществлении реакции с положительным выходом энергии. Здесь необходимо решить ряд технологических и физических задач, связанных, с детальным изучением баланса энергии [4]. В плазме существует целый ряд каналов энергетических потерь, которые были выявлены в экспериментах по её удержанию. Приведём основные направления технологических исследований по поиску путей решения этой проблемы:

- поиск режимов улучшенного удержания;
- применение дополнительного нагрева;
- подготовка поверхности передней стенки, инжекция макрочастиц в плазму;
- анализ различных конфигураций диафрагм и дивертора;
- активное управление конфигурацией плазменного шнура;
- оптимизация параметров разряда [5].

1.1 Влияние радиационных потерь на удержание плазменного шнура

Радиационные потери плазмы связаны с излучением электромагнитных волн в диапазоне от радиочастот до рентгеновских. Они обусловлены торможением ускоренных частиц плазмы, а также атомными переходами в возбуждённых атомах и ионах. Важно отметить, что интенсивность радиационных потерь сильно зависит от наличия примесей многозарядных ионов в высокотемпературной плазме [6].

Радиационные потери входят в уравнение энергоданса для электронов. Излучение плазменного шнура влияет на профиль температуры электронов. Электрическое сопротивление плазмы сильно зависит от локальной электронной температуры, определяющей профиль плотности тока и запас устойчивости плазменного шнура. Измерения радиационных потерь позволяют изучать поведение примесей, механизм их поступления и динамику движения в плазме.

Интегральный баланс энергии в установке типа токамак определяется по формуле

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{OH} - \frac{P_{transfer}}{\tau_E} - P_{rad},$$

где W – запас энергии в плазме, P_{OH} – мощность омического нагрева, $P_{transfer}$ – мощность потерь, связанная с уходом из плазмы высокоэнергетических частиц, и приходом в неё частиц, распылённых с передней стенки, τ_E – энергетическое время жизни плазмы, P_{rad} – мощность радиационных потерь [7].

Важность измерения мощности радиационных потерь обусловлена в первую очередь тем, что доля уносимой энергии очень велика и составляет от 40 – 80 % из всей вкладываемой мощности. Наиболее интенсивно плазма излучает в области дивертора, где она находится в прямом контакте со стенками камер. В этой области температура электронов относительно низкая от 10 до 100 эВ [8].

В настоящее время проводят исследования, связанные с работой токамаков в так называемом H-mode режиме, когда удаётся существенно увеличить скорость разогрева плазмы, в частности, за счёт инжекции в неё нейтральных пучков высокоэнергетических атомов. В H-mode режиме количество примесей в плазменном шнуре не только увеличивается, но и приводит к улучшению удержания частиц. Кроме того, в H-mode режиме температура частиц на периферии в разы выше, чем в L- mode режиме.

1.2. Измерение радиационных потерь

Для регистрации и измерения радиационных потерь на современных токамаках используют болометры. Болометр - прибор для измерения энергии излучения, основанный на изменении электрического сопротивления термочувствительного элемента при нагревании его вследствие поглощения измеряемого потока излучения. В таблице 1 представлены некоторые типы болометров, используемые в современных токамаках. Кроме того, применяются многоканальные датчики, с помощью которых можно выяснить распределение радиационных потерь из плазменного шнура, а также получить данные временного и пространственного распределения радиационных потерь плазмы.

Таблица 1.1 Виды используемых болометров на токамаках

Тип датчика	Спектральное разрешение	Временное разрешение
Пироэлектрический болометр	2000 Å – 0.2 нм	1 мс
Фотодиод	0.1 Å – 10000 Å	не хуже 10^{-4} с
Полупроводниковый термистор	300 Å – 2 мм	2.5 мс
Металлический болометр	2000 Å – 0.2 нм	2-20 мс

Металлический болометр

Металлический фольговый болометр состоит из трех слоев, металлического абсорбирующего слоя, теплопроводящего, но электрически изолирующего слоя подложки, и слоя металлического резистора (см. рисунок 1.1).

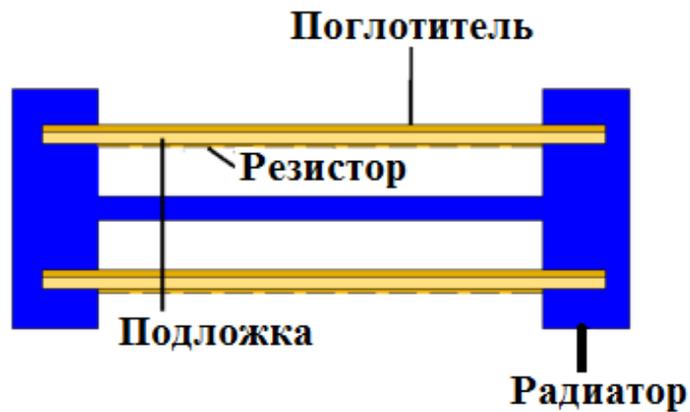


Рисунок 1.1 – Схема конфигурации металлического болометра

При попадании излучения на поглотитель растёт его температура. Тепло проходит через подложку к слою резистора. Температура резистора увеличивается, следовательно растёт и его сопротивление. Слои резистора выполнен из того же металла, что и слой поглотителя. Он изготовлен в виде меандра, и имеет сопротивление в несколько кОм.

В качестве поглотителя обычно используется золото или платина. Толщина слоя поглотителя составляет около 3-4 мкс. Эти металлы имеют хорошую чувствительность к электромагнитному излучению с длиной волны от 2000 \AA до диапазона мягкого рентгеновского излучения [9].

Термисторы

Термисторы изготавливаются из материалов с высоким температурным коэффициентом сопротивления. Это германий, оксиды марганца, кобальта или никеля. Абсорбирующий элемент изготавливается путем спекания пластин из вышеперечисленных материалов. Он устанавливается на электрически изолирующий, но теплопроводящий материал, такой как сапфир. Падающее излучение повышает температуру термистора, и, таким образом, уменьшается его сопротивление. Термисторы являются высокочувствительными приборами, и используются на токамаках Alcator A, RBX и ATC [10].

Фотодиод

Фотодиод (AXUV) – детекторы, используемые для регистрации и контроля пространственного профиля интегральных радиационных потерь высокотемпературной плазмы. Виды регистрируемых радиационных потерь: мягкое рентгеновское; вакуумное ультрафиолетовое; и видимый свет. AXUV – детекторы используются во многих современных установках, таких как, T-10, ADITYA, NSTX [11].

Пирозлектрический болометр

Основным чувствительным элементом пирозлектрического болометра является кристалл, обладающий пирозлектрическими свойствами. Например, ниобат лития, танталат лития. Пирозлектрические кристаллы обладают свойством поляризации. При попадании частиц на поверхность пирозлектрика меняется температура поляризующегося вещества, в следствии чего происходит мгновенное изменение спонтанной поляризации, что отражается на процессе протекания тока между поглотителем и подложкой. Так как сила тока очень малая, используют операционный усилитель-преобразователь ток-напряжения с высоким показателем сопротивления. Пирозлектрический болометр используется в таких токамаках, как T-15, T-10, КТМ, Глобус-М. Также использование пирозлектрического болометра планируется на токамаке ИТЭР[12].

Глава 2. Диагностика радиационных потерь на токамаке КТМ

Диагностический комплекс для измерения радиационных потерь, разработанный для токамака КТМ, использует пироэлектрический болометр (см. рисунок 2.1 а) и AXUV-детектор (см. рисунок 2.1 б, в). Чувствительными элементами соответственно являются пироэлектрический кристалл [13] ниобата лития (LiNbO_3) [14] и фотодиод. Они закреплены на фланце экваториального патрубка токамака КТМ.

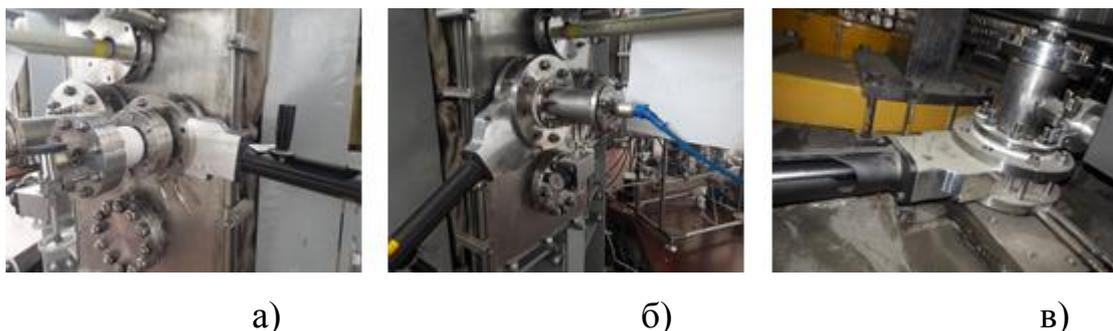


Рисунок 2.1 – Внешний вид диагностики радиационных потерь

2.1 AXUV-диагностика

Диагностика AXUV - предназначена для контроля пространственного профиля интегральных радиационных потерь высокотемпературной плазмы. Виды регистрируемых радиационных потерь плазмы: вакуумное ультрафиолетовое и мягкое рентгеновское электромагнитное излучение.

Базовым узлом многоканального монитора радиационных потерь является ФПУ, построенное на основе специального кремниевого 32-элементного детектора (см. рисунок 2.2) с предельно уменьшенной толщиной так называемого «мертвого слоя» на поверхности, что обеспечивает его высокую чувствительность в спектральной области вакуумного ультрафиолетового излучения, поглощаемого в тонкой приповерхностной области детекторов. Детектор используется как одномерная 16-канальная линейка с попарно-параллельным включением соседних элементов, и совместно с 16-канальным предусилителем размещен внутри вакуумной камеры-обскуры.

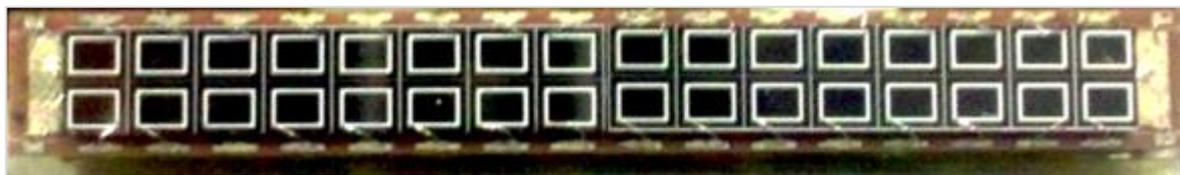


Рисунок 2.2 – Фотоприемное устройство

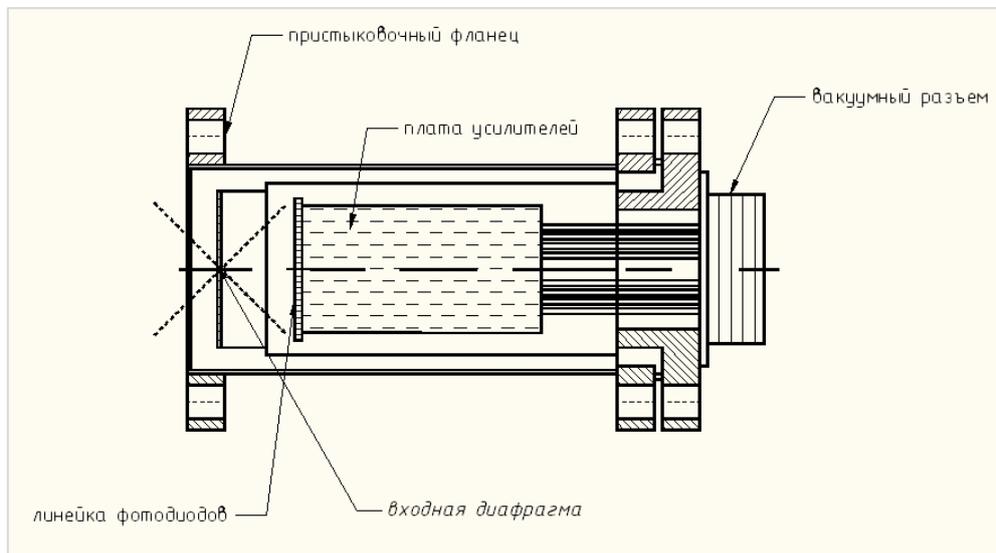
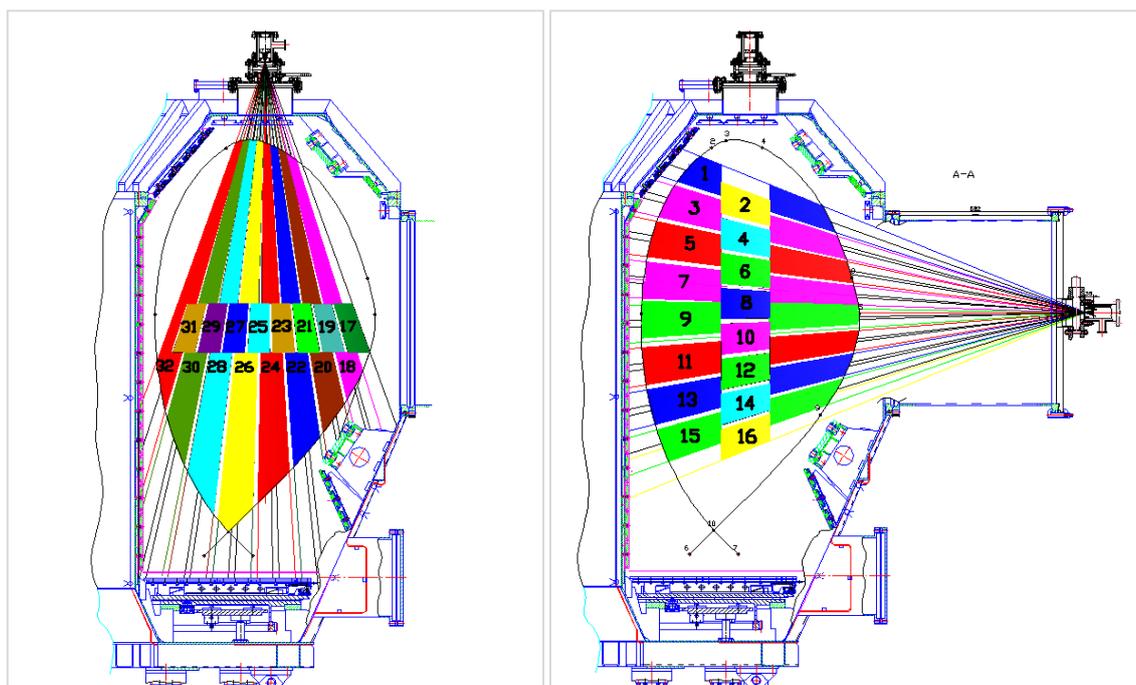


Рисунок 2.3 – Схематичный разрез камеры-обскуры

Электромагнитное излучение плазмы проходит через коллимирующую диафрагму и регистрируется детектором, расположенным в ФПУ, сигнал которого усиливается малошумящим предварительным усилителем, и далее через выходной 50-штырьковый вакуумный разъем РСГС-50 поступает на внешний блок, выполняющий функцию масштабирующего усилителя с автокомпенсацией дрейфа. Далее сигнал поступает на вход регистрирующего устройства (АЦП).

AXUV-детекторы расположены на секторе №8 токамака КТМ. Схемы размещения и хорды наблюдения AXUV-детекторов на установке КТМ представлены на рисунке 2.4.



а) трековый

б) экваториальный

Рисунок 2.4 – Хорды наблюдения AXUV-детекторов

2.2 Пирозлектрический болометр

В роли поглотителя пирозлектрического болометра используется кристалл ниобата лития. Пирозлектрический кристалл имеет форму диска с размерами 10 мм в диаметре и толщиной 1 мм. На поверхность диска нанесен слой серебра толщиной 2-5 мкм.

Усилитель напряжения представляет собой преобразователь ток-напряжение с постоянным сопротивлением в 680 Мом. Выходной сигнал с усилителя поступает через опторазвязки на АЦП (см. рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Структурная схема регистрации пироболометра

Пироболометр расположен в экваториальном патрубке токамака КТМ и имеет углы обзора в тороидальном сечении – 6° , полоидальном сечении – 39°

(см. рисунок 2.7). Пироболометр размещен на заглушке экваториального патрубка с клапаном для возможности оперативной установки и демонтажа пироболометра и гальванической развязкой керамическим изолятором от потенциала вакуумной камеры (см. рисунок 2.1).

Пироболометр размещен в цилиндрическом немагнитном стальном корпусе, выполненном из нержавеющей стали, и показан на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Внешний вид конструкции пироболометра

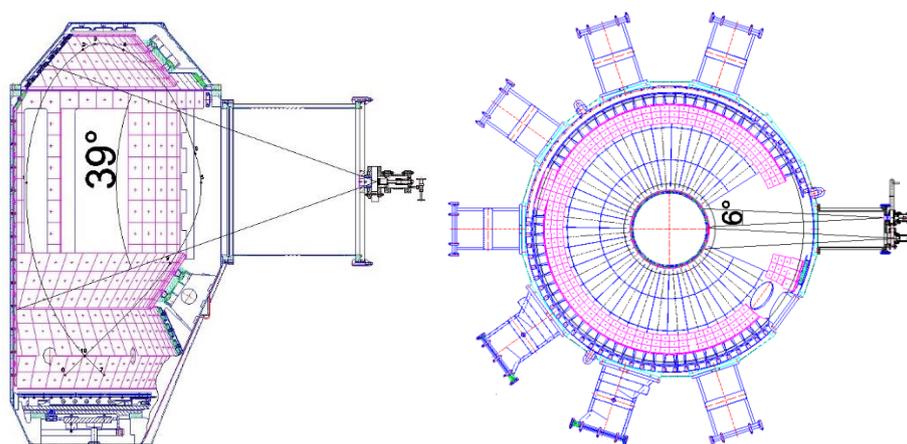


Рисунок 2.7 – Угол обзора пироболометра

Для уменьшения влияния электромагнитных наводок, усилитель сигнала детектора был установлен в непосредственной близости от ЧЭ в вакуумной камере. Операционным усилителем является прецизионный фемтоамперный усилитель LMC-6001. Все необходимые электрические соединения осуществлены с помощью вакуумного разъема РСГС-10.

На плоском торце крышки корпуса расположено круглое окошко, пропускающее потоки электромагнитного излучения и нейтральных частиц из плазмы токамака. Конструкция пироболометра, такова, что изоляторы, фиксирующие ЧЭ, ограничивают теплопередачу, воспринимающего

излучения из плазмы, а физические свойства ЧЭ – практически не обладают тепловой инерционностью показаний.

2.3 Алгоритм расчета экспериментальных данных с пироболометра

Полная мощность излучения плазмы рассчитывается по данным, полученным с коллимированного детектора с линией наблюдения вдоль большого радиуса токамака.

Мощность излучения, падающая на пиродетектор вычисляется соотношением выходного напряжения пироболометра к нормированному коэффициенту связи, который был рассчитан во время калибровки пироболометра.

$$P_{det} = \frac{U_{out}}{k} \quad (1)$$

Для перехода от напряжения регистрируемого сигнала в АЦП к мощности излучения плазмы, вводим необходимые геометрические множители, учитывающие коллимацию падающего потока, угол обзора детектора и учитывая данные, полученные из калибровки определяем связь между полученным напряжением и мощностью излучения плазмы.

На основании измерений вдоль большого радиуса тора можно рассчитать полную мощность излучения плазмы. Мощность, падающая на детектор равна произведению мощности излучения из единицы тороидальной длины вдоль большого радиуса R и единицы телесного угла Ω на угол обзора детектора:

$$P_{det} = \frac{P_{rad}}{2\pi R} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi R} \cdot \Delta y \quad (2)$$

Ω – телесный угол, под которым приемник «видит» плазму;

Δy – угол обзора в тороидальном сечении;

P_{det} – мощность излучения, падающая на детектор;

P_{rad} – мощность излучения плазмы;

Угол обзора в тороидальном сечении:

$$\Delta y = \frac{d_{det}}{a} \cdot L \quad (3)$$

d_{det} – диаметр ЧЭ;

a – расстояние от ЧЭ до коллимирующей диафрагмы;

L – расстояние от центра плазмы до коллимирующей диафрагмы.

Телесный угол, под которым приемник «видит» плазму, с учетом размеров коллимирующей диафрагмы равен:

$$\Delta\Omega = \Delta\alpha \cdot \Delta\beta \quad (4)$$

$\Delta\alpha$ – угловая мера в тороидальном сечении;

$\Delta\beta$ – угловая мера в полоидальном сечении.

Для того чтобы найти телесный угол необходимо вычислить радианную угловую меру. Угловая мера – число определяющее, величину угла. Радианная мера угла — отношение длины s стягивающей дуги к радиусу r . (данная мера используется при описании колебаний, волн и т.д.). Учитывая это, получаем:

$$\Delta\alpha = \frac{l_a}{L} \quad (5)$$

$$\Delta\beta = \frac{d_{det}}{L+a} \quad (6)$$

$$\Delta\Omega = \frac{l_a}{L} \cdot \frac{d_{det}}{L+a} \quad (7)$$

где l_a , d_{det} – размер, стягивающей поверхности (длина и круг)

Подставив в (2) и преобразовав получим следующее выражение для мощности излучения плазмы:

$$P_{rad} = \frac{8\pi^2 R}{\Omega \cdot \Delta y} = \frac{8\pi^2 R}{\frac{l_a}{L} \cdot \frac{d_{det}}{L+a} \cdot \frac{d_{det}}{a} \cdot L} \cdot \frac{U}{k} = \frac{8\pi^2 R \cdot (L+a) \cdot a}{l_a \cdot d_{det}^2} \cdot \frac{U_{out}}{k} \quad (8)$$

где $d_{det} = \pi D$, D – ‘полезный’ диаметр таблетки.

Глава 4. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Основной целью данного раздела является оценка перспективности развития и планирования финансовой и коммерческой ценности конечного продукта, представленного в рамках исследовательской программы. Коммерческая ценность определяется не только наличием более высоких технических характеристик над конкурентными разработками, но и тем, насколько быстро разработчик сможет ответить на следующие вопросы – будет ли продукт востребован на рынке, какова будет его цена, каков бюджет научного исследования, какое время будет необходимо для продвижения разработанного продукта на рынок.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;
- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрен метод диагностики высокотемпературной плазмы в установках типа токамак, в частности измерение радиационных потерь плазмы с помощью пироэлектрического болометра. Одним из важнейших особенностей для увеличения времени и улучшение удержания высокотемпературной плазмы, является написание сценариев для пробоя тока в рабочем газе вакуумной камеры и подачи напряжения на центральный соленоид токамака. Также для написания сценариев необходимо учитывать свойства излучения высокотемпературной плазмы, так как доля потери энергии плазмы на излучения может достигать до 80 %. Поэтому диагностика радиационных потерь плазмы используются на каждом термоядерном реакторе.

Одним из предприятий заинтересованных в этой области является Филиал «Институт Атомной Энергии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

4.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Технические требования к болометру: компактный размер, высокая температурная стойкость, высокая вакуумная совместимость, низкая чувствительность к температурным изменениям в корпусе, компенсация нейтронов и α - β - излучения, высокая помехоустойчивость и простота в калибровке.

Основными конкурентами пироэлектрического болометра являются полупроводниковые болометры, металлические болометры и термисторы. Альтернативным методом измерения мощности излучения плазмы являются кремниевые фотодиоды AXUV, регистрирующие излучение в диапазоне 1 эВ – 15 кэВ. Как правило, они имеют временное разрешение порядка микросекунды и относительно просты в эксплуатации.

Пироэлектрический болометр. Малые габариты, высокая чувствительность, долговечность срока службы и относительно не дороговизна. Минусами можно считать подверженность в сильной степени шумам и наводкам, в том числе вследствие паразитного пьезоэлектрического эффекта.

AXUV – фотодиоды. Фотодиоды используются для абсолютных измерений радиационных потерь в вакуумном ультрафиолетовом, далеком ультрафиолетовом и мягком рентгеновском спектральных диапазонах, которым соответствуют энергии фотонов 30, 40 эВ и выше [54,55]. Однако стоит учитывать, что данные фотодиоды обладают сильно изменяющейся

спектральной чувствительностью в диапазоне низких энергий, что накладывает необходимость дополнительной интерпретации измеряемых сигналов.

Таблица 4.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Актуальность исследования	0,2	5	4	4	1	0,8	0,8
2. Мощность	0,1	4	5	3	0,4	0,5	0,3
3. Простота конструкции	0,15	4	3	3	0,6	0,45	0,45
4. Простота изготовления	0,09	4	3	3	0,36	0,27	0,27
5. Эффективность работы	0,1	5	5	5	0,5	0,5	0,5
6. Безопасность	0,08	4	4	4	0,32	0,32	0,32
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Цена	0,09	5	3	4	0,45	0,27	0,36
2. Предполагаемый срок эксплуатации	0,06	5	5	5	0,3	0,3	0,3
3. Финансирование научной разработки конкурентных товаров и разработок	0,08	5	5	4	0,4	0,4	0,32
4. Уровень проникновения на рынок.	0,05	4	5	4	0,2	0,25	0,2
Итого	1	45	42	39	4,53	4,08	3,82

Расчет конкурентоспособности, определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i$$

где К – конкурентоспособность проекта; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл показателя.

Согласно вышеприведенной таблице видно, что предлагаемая система (оборудование) имеет большую конкурентоспособность, чем ее аналоги. Это обуславливается более простой конструкции и эксплуатацией, высокую надежность и производительность, а самое главное экономическую составляющую по сравнению с другими конкурентными решениями.

4.1.2 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Проведем SWOT-анализ исследования радиационных потерь плазмы с помощью пироэлектрического болометра, для выявления сильных и слабых сторон данного метода.

Таблица 4.2 – SWOT-анализа

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта: С1. Методика измерений С2. Экономичное использование электроэнергии. С3. Компактность установки С4. Простота монтажа установки и эксплуатация.	Слабые стороны научно-исследовательского проекта: Сл1. Недостаточная инструментальная база для проведения измерений; Сл2. Использование устаревшего оборудования для измерений.
Возможности: В1. Дополнение научно-технической базы токамака КТМ для достижения проектных параметров; В2. Повышение качеств плазменных разрядов.	Проведение дальнейших исследований и открытие новых перспектив, по усовершенствованию установки и сотрудничеству с научными исследовательскими центрами могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.	В свою очередь неполноценность метода диагностики измерений может внести много трудностей при работе с установкой и разработке новых проектов.
Угрозы: У1. Появление более актуальных методик; У2. Зачернение и напыление поверхности чувствительного элемента.	Угрозы слабо влияют на сильные стороны проекта, так как присутствует возможность ее усовершенствования и проведения новых опытов.	Угрозы могут отрицательно сказаться на реализации данной установки в научно-исследовательской деятельности, так как появление более актуальных методик могут сыграть свою роль.

Выводы: К плюсам можно отнести продолжение проведения дальнейших исследований и открытие новых идей по усовершенствованию установки, в том числе и сотрудничеству с научными исследовательскими

центрами, которым могут способствовать выше перечисленные сильные стороны НИП, такие как дешевизна, простота и компактность.

К минусам относятся угрозы, которые могут отрицательно сказаться на реализации данной установки, так как малый спрос и появление более новых методик могут сыграть свою роль.

4.2 Планирование научно-исследовательских работ

4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Научный руководитель
	2	Календарное планирование выполнения ВКР	Инженер, научный руководитель
Выбор способа решения поставленной задачи	3	Обзор научной литературы	Инженер
	4	Выбор методов исследования	Инженер
	5	Планирование эксперимента	Инженер, научный руководитель

Теоретические и экспериментальные исследования	6	Подготовка оборудования для эксперимента	Инженер
	7	Проведение эксперимента	Инженер
Обобщение и оценка результатов	8	Обработка полученных данных	Инженер
	9	Обобщение и оформление полученных результатов	Инженер, Научный руководитель
Оформление отчета по НИР (комплекта документации по ОКР)	10	Составление пояснительной записки. 0	Инженер

4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (4.1)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями. Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{C_i}, \quad (4.2)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

Ч_i – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (4.3)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Календарный коэффициент определяется по формуле:

$$k_{кал.инж} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (4.4)$$

где $T_{кал}$ – общее количество календарных дней в году; $T_{вых}$ – общее количество выходных дней в году; $T_{пр}$ – общее количество праздничных дней в году.

Расчеты временных показателей проведения научного исследования обобщены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях T_{pi}	Длительность работ в календарных днях T_{ki}
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		$t_{ожг}$, чел-дни			
	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2	Исп.1	Исп.2		
1	2	3	4	5	6	7	8	9

1. Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	1	-	3	-	2	-	3	3
2. Календарное планирование выполнения ВКР	1	3	3	4	1,8	3,4	3	4
3. Обзор научной литературы	-	6	-	10	-	7,6	8	11
4. Выбор методов исследования	-	3	-	5	-	3,8	5	6
5. Планирование эксперимента	2	6	4	8	2,8	6,8	5	7
6. Подготовка оборудования для эксперимента	-	5	-	7	-	5,8	6	9
7. Проведение эксперимента	-	15	-	20	-	17	17	25
8. Обработка полученных данных	-	10	-	15	-	12	14	18
9. Оценка правильности полученных результатов	2	3	4	5	2,8	3,8	5	5
10. Составление пояснительной записки		8		10	-	8,8	10	13
Итого:	6	59	14	84	9,4	69	76	102

Примечание: Исп. 1 – научный руководитель, Исп. 2 – инженер.

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп	T _{кi} · кал · дн.	Продолжительность работ																										
				февр			март			апр			май			июнь			июль			август			сентябрь					
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
1	Составление и утверждение технического задания, утверждение плана-графика	Исп 1	4	1																										
2	Календарное планирование выполнения ВКР	Исп 1 Исп 2	4	1																										
3	Обзор научной литературы	Исп 2	11																											
4	Выбор методов исследования	Исп 2	6																											
5	Планирование эксперимента	Исп 1 Исп 2	7																											
6	Подготовка оборудования для эксперимента	Исп 2	9																											
7	Проведение эксперимента	Исп 2	25																											
8	Обработка полученных данных	Исп 2	18																											
9	Оценка правильности и полученных результатов	Исп 1 Исп 2	5																											
10	Составление пояснительной записки	Исп 2	13																											

Примечание:

 – Исп. 1 (научный руководитель),  – Исп. 2 (инженер)

4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

4.3.1 Расчет материальных затрат НИИ

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции. Результаты расчета затрат представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	340	4	1 200
Картридж для лазерного принтера	3 490	1	3 490
Бумага формат А4	250	3	750
Диодная лампа	150	2	300
Операционный усилитель	191,8	1	191,8
Пирозлектрический кристалл	1680	1	1680
Итого:			7611,8

4.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных работ

Таблица 4.7 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во, шт.	Цена единицы оборудования, руб.	Общая стоимость оборудования, руб.
1	Фланец CF-63	2	3400	6800
2	Переходник CF-63	1	2000	2000
3	Металлический стакан	1	2000	2000
Итого:				10800

4.4 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p, \quad (4.5)$$

где $Z_{дн}$ – средневзвешенная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 4.8).

Средневзвешенная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.}, \quad (4.6)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического

персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

Должностной оклад работника за месяц:

– для руководителя:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.} \quad (4.8)$$

– для инженера:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}} \cdot (1 + k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) k_{\text{р}} = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.}, \quad (4.9)$$

где $Z_{\text{мс}}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; $k_{\text{пр}}$ – премиальный коэффициент, равен 0,3; $k_{\text{д}}$ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; $k_{\text{р}}$ – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 4.8 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер.
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 4.9 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$Z_{\text{мс}}, \text{руб}$	$k_{\text{пр}}$	$k_{\text{д}}$	$k_{\text{р}}$	$Z_{\text{м}}, \text{руб}$	$Z_{\text{дн}}, \text{руб}$	$T_{\text{р}}, \text{раб.дн.}$	$Z_{\text{осн}}, \text{руб}$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	14	30062,2
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	76	132475,6
Итого:								162537,8

4.4.1 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 30062,2 = 4509,33 \text{ .,} \quad (4.10)$$

– для инженера:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,15 \cdot 132475,6 = 19871,34 \text{ .,} \quad (4.11)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

4.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{внеб} + Z_{доп}) = 0,2 \cdot (30062,2 + 4509,33) = 6914,3 \text{ руб.} \quad (4.12)$$

– для инженера:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{внеб} + Z_{доп}) = 0,2 \cdot (132475,6 + 19871,34) = 30469,4 \text{ руб.}, \quad (4.13)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 20% (СТ. 1, 166 НК РК).

4.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма 5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.14):

$$Z_{накл} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{нр}, \quad (4.14)$$

где $k_{нр}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

4.7 Расчет бюджетной стоимости

Таблица 4.10 – Группировка затрат по статьям

1	2	3	4	5	6	7	8
Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Бюджетная стоимость
7611,8	162537,8	24380,67	10800	37383,7	242713,17	48542,634	291255,804

4.8 Определение ресурсной (ресурсосберегающей) эффективности исследования

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{291255,804}{600000} = 0,485$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{600000}{600000} = 1$$

$$I_{исп.3} = \frac{400000}{600000} = 0,67$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 4.10).

Таблица 4.11 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1. Безопасность при использовании установки	0,15	5	4	3
2. Стабильность работы	0,2	4	4	4
3. Технические характеристики	0,2	4	3	3
4. Точность измерений	0,3	4	5	4
5. Ремонтнопригодность	0,15	5	1	1
ИТОГО	1	4,15	3,65	3,2

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,15$$

$$I_{p2} = 0,15 \cdot 4 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 1 = 3,65$$

$$I_{p3} = 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3 + 0,3 \cdot 4 + 0,15 \cdot 1 = 3,2$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}} \quad (20)$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,15}{0,9} = 4,61; \quad I_{исп.2} = \frac{3,65}{0,91} = 4,01; \quad I_{исп.3} = \frac{3,2}{0,91} = 3,52$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 4.11).

Таблица 4.12 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,15	3,65	3,2
2	Интегральный показатель эффективности	4,61	4,01	3,52
3	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,81	0,78

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими. Таким вариантом является результат проведенных исследований.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей.

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет **291255,804 руб.**

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:
- значение интегрального показателя ресурсоэффективности научной разработки составляет: 0,42.

Глава 5. Социальная ответственность

Целью выполнения выпускной квалификационной работы (ВКР) является исследование радиационных потерь на токамаке КТМ с помощью пирозлектрического болометра.

В экспериментальной части ВКР были проведены калибровка пирозлектрического болометра, проведены эксперименты с целью исследования процесса формирования плазменного шнура на токамаке КТМ в режиме омического нагрева с использованием рабочего газа водород.

Выполнение ВКР проводилось в Филиале «Институт Атомной Энергии» Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан». Для выполнения экспериментальной части ВКР в качестве рабочего места использовались лабораторное помещение, компьютерный стол с ЭВМ, соответствующее периферийное оборудование (монитор, клавиатура, мышь) и программное обеспечение (Microsoft Word, Microsoft Excel, Charter). Потенциальными пользователями результатов исследования являются Филиал Институт Атомной Энергии Республиканского государственного предприятия на праве хозяйственного ведения «Национальный ядерный центр Республики Казахстан».

5.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

5.1.1 Специальные (характерные для рабочей зоны исследователя) правовые нормы трудового законодательства

Основные положения по охране труда изложены в Трудовом кодексе Российской Федерации [15]. В этом документе указано, что охрана здоровья трудящихся, обеспечение безопасных условий труда, ликвидация

профессиональных заболеваний и производственного травматизма являются одной из главных забот государства.

Согласно Трудовому кодексу Российской Федерации каждый работник имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний;
- получение достоверной информации от работодателя, соответствующих государственных органов и общественных организаций об условиях и охране труда на рабочем месте, о существующем риске повреждения здоровья, а также о мерах по защите от воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда;
- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- обучение безопасным методам и приемам труда за счет средств работодателя;
- личное участие или участие через своих представителей в рассмотрении вопросов, связанных с обеспечением безопасных условий труда на его рабочем месте, и в расследовании происшедшего с ним несчастного случая на производстве или профессионального заболевания;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра;
- гарантии и компенсации, установленные в соответствии с настоящим кодексом, коллективным договором, соглашением, локальным нормативным актом, трудовым договором, если он занят на работах с вредными и (или) опасными условиями труда.

В трудовом кодексе Российской Федерации говорится, что нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю, работодатель обязан вести учет времени, отработанного каждым работником [15].

5.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны исследователя

Рабочее место при работе с ПК должно составлять не менее чем 6 м² [15]. Выполнение экспериментальной части ВКР проводились в лабораторном помещении, а также в центральном зале и в кабинете 15 лабораторного комплекса. Общая площадь кабинета составляет 81 м², по 13,5 м² на одного оператора ЭВМ, что соответствует гигиеническим требованиям при работе с ЭВМ. Пространство для ног должно соответствовать следующим параметрам: высота пространства для ног не менее 600 мм, расстояние сиденья до нижнего края рабочей поверхности не менее 150мм, а высота сиденья 420 мм [16].

Так же предусмотрены следующие требования к организации рабочего места пользователя ПЭВМ: конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ. Рабочий стул (кресло) должен быть подъемно-поворотным, регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья, при этом регулировка каждого параметра должна быть независимой, легко осуществляемой и иметь надежную фиксацию [16].

5.2 Производственная безопасность

5.2.1 Анализ вредных и опасных факторов

Объектом исследования являются высокотемпературная плазма в термоядерной установке под напряжением, что представляет собой повышенный показатель электромагнитного излучения и опасность поражения электрическим током. Наиболее вероятные факторы воздействия представлены в таблице 5.1[17].

Таблица 5.1. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы	Нормативные документы
1.Отклонение показателей микроклимата	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2.Превышение уровня шума	СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
3.Повышенный уровень электромагнитного излучения	СанПиН 2.2.2/2.4.1340–03. Санитарноэпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
4.Недостаточная освещенность рабочей зоны	СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
5.Поражение электрическим током	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
6. Психофизиологические факторы	Р 2.2.2006-05 Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда

При проведении работ, связанных с теоретическим исследованием, важную роль играет планировка рабочего места. Она должна соответствовать правилам охраны труда и удовлетворять требованиям удобства выполнения работы, экономии энергии и времени инженера.

Основным документом, определяющим условия труда при работе с ПЭВМ, является СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы». В правилах указаны основные требования к помещениям, микроклимату, шуму и вибрации, освещению помещений и рабочих мест, организации и оборудованию рабочих мест.

Основными опасными факторами являются опасность поражения электрическим током и возгорание. Исходя из анализа состояния помещения, рабочее место инженера, занимающегося теоретическими исследованиями, по степени опасности поражения электрическим током можно отнести к классу помещений без повышенной опасности [18].

5.2.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха). Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Оптимальные нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха производственных помещений для работ, производимых сидя и не требующих систематического физического напряжения (категория Ia), приведены в таблице 5.2, в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и [19].

Таблица 5.2. Нормы температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	22÷24	40÷60	0,1
Теплый	Ia	23÷25	40÷60	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3. Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория тяжести работ	Температура, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, не более м/с
Холодный	Ia	20÷25	15÷75	0,1
Теплый	Ia	21÷28	40÷75	0,1÷0,2

5.2.2.2 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в условиях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

По нормативу [15] освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк.

Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50° до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна

составлять не более 200 кд/м, защитный угол светильников должен быть не менее 40°. Коэффициент запаса (K_3) для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%.

5.2.2.3 Повышенный уровень шума

Акустический шум является одним из раздражителей организма человека при длительном воздействии. При шумовом воздействии учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, возникают головные боли, ослабляется внимание и замедляются психические реакции, что в конечном итоге приводит к снижению работоспособности человека.

Источниками шума на рабочем месте могут быть различные двигатели и механизмы, используемые в офисной технике. Для категории тяжести работ Ia уровень шума на рабочем месте трудящегося не должен превышать 50 Дб [20].

5.2.2.4 Повышенный уровень электромагнитного излучения

Основное рабочее оборудование – персональный компьютер, является источником электромагнитного излучения. Как и шум, электромагнитное поле своим воздействием может быть причиной учащенного пульса, дыхания, повышения артериального давления, возникновения головных болей, ослабления внимания и замедления реакции, что снижает общую работоспособность человека. Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц, и в том числе мощность экспозиционной дозы мягкого рентгеновского излучения в любой точке на расстоянии 0,05 м от экрана при любых положениях ПК не должна превышать 100 мкР/ч [21].

5.2.2.5 Психофизиологические факторы

На оператора ЭВМ также воздействуют психофизиологические опасные и вредные производственные факторы. Они делятся на: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки). При работе с ПЭВМ физические перегрузки вызваны рабочей позой и повторением стереотипных рабочих движений, а нервнопсихические – напряженностью трудового процесса.

5.2.2.6 Поражение электрическим током

Знание допустимых для человека значений тока и напряжения позволяет правильно оценить опасность поражения и определить требования к защитным мерам от поражения электрическим током.

Сила поражения электрическим током и тяжесть его воздействия зависит от таких факторов, как: мощность разряда, время воздействия, характер тока, а также состояние здоровья человека, его возраста, влажности тела, а также от места соприкосновения и пути прохождения тока по организму

В результате поражения электрическим током возможно местное поражение тканей и органов электрическим током: ожоги, поражение глаз воздействием на них электрической дуги (электроофтальмия), механические повреждения (разрыв тканей).

ГОСТ 12.1.038-82 устанавливает предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека. Под напряжением прикосновения понимается напряжение между двумя точками цепи тока, которых одновременно касается человек. Нормы предназначены для проектирования способов и средств защиты от поражения электрическим током людей при их взаимодействии с электроустановками. Они соответствуют прохождению тока через тело человека по пути рука-рука или рука-ноги [17].

Стандарт предусматривает нормы для электроустановок при нормальном (неаварийном) режиме их работы, а также при аварийных режимах производственных и бытовых электроустановок. Значения напряжения прикосновения и силы тока, протекающего через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме работы электроустановки, не должны превышать значений, приведенных в таблице 5.4.

Таблица 5.4. Предельно допустимые значения напряжения соприкосновения и силы тока

Род и частота тока	Наибольшие допустимые значение	
	U_{np} , В	I_h , мА
Переменный, 50 Гц	2	0,3
Переменный, 400 Гц	3	0,4
Постоянный	8	1,0

Для лиц, выполняющих работу в условиях высокой температуры и влажности (относительная влажность больше 75%), эти нормы должны быть уменьшены в три раза.

5.2.2.7 Пожаробезопасность на рабочем месте

Пожар, из-за непосредственной связи с техническими объектами, классифицируют как непреднамеренную чрезвычайную ситуацию техногенного характера [18].

Пожаробезопасность в производственном помещении направлена на сохранение материальных ценностей, жизни и здоровья людей от неконтролируемого процесса горения. Для определения способов осуществления пожаробезопасности необходимо определить категории помещений определяются, исходя из вида находящихся в помещениях горючих веществ и материалов, их количества и пожароопасных свойств, а также, исходя из объемно-планировочных решений и помещений и характеристик проводимых в них технологических процессов [18].

5.2.3 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия опасных и вредных факторов

5.2.3.1 Требования к помещениям для работы с ПЭВМ

В соответствии с [27] помещения для эксплуатации ПЭВМ должны иметь естественное и искусственное освещение. Площадь одного рабочего места пользователя ПЭВМ с видеодисплейным терминалом (ВДТ) на базе электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) должна составлять не менее 6 м², а для ВДТ на базе плоского дискретного экрана (жидкокристаллический, плазменный) 4,5 м².

5.2.3.2 Микроклимат

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажности воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования. Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли [19].

5.2.3.3 Недостаточная освещенность рабочей зоны

Рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы ВДТ были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева. Также как средство защиты для минимизации воздействия фактора следует установка местного освещения из-за недостаточной освещенности, оконные проемы должны быть оборудованы регулируемыми устройствами типа: жалюзи, занавесей, внешних козырьков.

Если помещение не соответствует вышеописанным нормам, то это влечет за собой ухудшение здоровья рабочих и как следствие ухудшение рабочего процесса.

5.2.3.4 Повышенный уровень шума

В исследовательских аудиториях имеют место шумы различного рода, которые генерируются как внутренними, так и внешними источниками шумов. В рассматриваемом случае внутренними источниками шумов являются рабочее оборудование, а именно персональный компьютер, принтер, вентиляционная система, а также компьютерная техника других инженеров, находящихся в аудитории. При возможном превышении предельно допустимого уровня (ПДУ) достаточно использовать в помещении звукопоглощающие материалы (звукопоглощающая облицовка стен и потолка, оконные шторы) [20]. Для уменьшения шума, проникающего снаружи помещения, следует установить уплотнения по периметру притворов дверей и окон.

5.2.3.5 Электромагнитные излучения (ЭМИ)

При возможном превышении ПДУ возможны следующие меры защиты: увеличение расстояния между источником ЭМИ и рабочей зоной, установка отражающих или поглощающих экранов, конструктивное совершенствование оборудования с целью снижения используемых уровней ЭМИ, общей потребляемой и излучаемой мощности оборудования.

5.2.3.6 Психофизиологические факторы

При длительной и монотонной работе за ПЭВМ работники неизбежно сталкиваются с нервно-психическими перегрузками, связанными с напряжённостью трудового процесса, возникающими от умственного перенапряжения, в том числе вызванного информационной нагрузкой;

монотонностью труда, эмоциональным перенапряжением. Для минимизации действия данного фактора необходимо соблюдать режим труда и отдыха [27].

5.2.3.7 Поражение электрическим током

Степень опасного воздействия на человека электрического тока зависит от рода и величины напряжения и тока, частоты электрического тока, пути прохождения тока через тело человека, продолжительности воздействия на организм человека, условий внешней среды. Основными мероприятиями по защите от поражения электрическим током являются:

- обеспечение недоступности токоведущих частей путём использования изоляции в корпусах оборудования;
- применение средств коллективной защиты от поражения электрическим током;
- использование защитного заземления, защитного зануления, защитного отключения;
- использование устройств бесперебойного питания [22].

Технические способы и средства применяют отдельно или в сочетании друг с другом так, чтобы обеспечивалась оптимальная защита.

Организационными мероприятиями по электробезопасности являются периодические и внеплановые инструктажи. Периодический инструктаж проводится всему неэлектротехническому персоналу, выполняющему следующие работы: включение и отключение электроприборов, уборка помещений вблизи электрощитов, розеток и выключателей и т. д. Весь неэлектротехнический персонал должен быть аттестован на первую квалификационную группу по электробезопасности. Периодический инструктаж проводится не менее одного раза в год.

Внеплановый инструктаж проводится руководителем подразделения при введении в эксплуатацию нового технического электрооборудования.

5.2.3.8 Пожаробезопасность на рабочем месте

Помещение должно быть оснащено системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре для своевременной эвакуации людей. Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Аудитории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок) [22].

5.3 Экологическая безопасность

5.3.1 Анализ возможного влияния объекта исследования на окружающую среду

В данном подразделе рассматривается характер воздействия разработанной термодинамической модели на окружающую среду. Модель не оказывает воздействия на окружающую среду. Однако, при расчетах и моделировании применялись ПЭВМ и периферийное оборудование. Для соблюдения экологической безопасности использование указанных устройств должно соответствовать требованиям нормативных документов.

5.3.2 Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду

Отработанные люминесцентные лампы являются очень опасным отходом, в них содержится ртуть в газообразном состоянии. Ртуть относится к вредным веществам первой категории, неправильная утилизация сильно отравляет окружающую среду и находящихся рядом людей [23].

С другой стороны, необходимо также отметить, что после использования компьютерной техники, которая содержит бериллий, кадмий, мышьяк, поливинилхлорид, ртуть, свинец, фталаты, огнезащитные составы на основе брома и редкоземельные минералы, образуются токсичные отходы,

которые не должны попадать на свалку после истечения срока использования, а должны правильно утилизироваться.

5.3.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

При перегорании ртутьсодержащей лампы (выходе из строя) её замену осуществляет лицо, ответственное за сбор и хранение ламп. Отработанные люминесцентные лампы сдаются только на полигон токсичных отходов для захоронения.

- Утилизация компьютерного оборудования осуществляется по специально разработанной схеме, которая должна соблюдаться в организациях:

- Создание комиссии, задача которой заключается в принятии решений по списанию морально устаревшей или не рабочей техники.

- Разработка приказа о списании устройств. Для проведения экспертизы привлекается квалифицированное стороннее лицо или организация.

- Составление акта утилизации, основанного на результатах технического анализа, который подтверждает негодность оборудования для дальнейшего применения.

- Формирование приказа на утилизацию.

- Утилизация оргтехники, осуществляемая специализированной фирмой.

После оформления всех необходимых документов, компьютерная техника вывозится со склада на перерабатывающую фабрику. Все полученные в ходе переработки материалы вторично используются в различных производственных процессах [24].

5.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Объектом исследования являются радиационные потери плазмы, что представляет собой электромагнитное излучение. При излучение плазмы наиболее вероятными могут быть α -, β - излучение [25].

5.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований

Исследования проводились с использованием персонального компьютера, при эксплуатации которого возможно возгорание. В современных компьютерах очень высокая плотность размещения элементов электронных систем, в непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода и коммуникационные кабели. При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 80-100 °С. При этом возможны оплавление изоляции соединительных проводов, их оголение и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением, которое ведет к недопустимым перегрузкам элементов электронных схем. Перегреваясь, они сгорают с разбрызгиванием искр [26].

5.4.2 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на: организационные, технические, эксплуатационные и режимные. Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и

оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение пожарной безопасности.

Рабочее помещение должно быть оборудовано пожарными извещателями, которые позволяют оповестить дежурный персонал о пожаре. При возникновении аварийной ситуации необходимо: сообщить руководителю (дежурному), позвонить в аварийную службу или МЧС - тел. 112, принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

Выводы

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности при работе на установке токамак КТМ, проведен анализ вредных и опасных производственных факторов. К таковым относятся отклонение показателей микроклимата, недостаточная освещенность, повышенный уровень шума, повышенный уровень электромагнитных излучений, поражение электрическим током. Обоснованы мероприятия по снижению уровней воздействия вредных и опасных факторов на исследователя. Рассмотрены вопросы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях. Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара вследствие короткого замыкания токоведущих частей. Разработан порядок действия в результате возникновения чрезвычайной ситуации и меры по ликвидации её последствий. Грамотное соблюдение норм и правил, приведенных в нормативных документах, позволяет снизить воздействие вредных и опасных факторов на окружающую среду и организм человека при работе над научно исследовательским проектом.

Заключение

В рамках выполнения диссертации на соискание академической степени магистра наук были изучены методы диагностики радиационных потерь высокотемпературной плазмы на токамаке КТМ.

Проведены работы по настройке и калибровке пироэлектрического болометра, вычислен нормировочный коэффициент связи между выходным напряжением и мощностью излучения, принимаемой детектором, равный 69 В/Вт.

Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных по характеристикам пусковых разрядов в аргоне и водороде, на основе которого показано, что мощность радиационных потерь на токамаке КТМ не превышает 20% от мощности омического нагрева.

На основе проведенной работы можно сделать следующие выводы: Разработанный алгоритм расчета полных радиационных потерь и в дальнейшем будет использоваться для изучения процесса излучения плазмы на токамаке КТМ.

Завершая изложение работы, хотелось бы выразить благодарность всем коллегам, помогавшим мне в работе и оказавшим влияние на ее результаты.

Список использованной литературы

1. Курнаев В.А. Стенд имитационных испытаний в сопровождение исследований на токамаке КТМ (СИИ-КТМ). МИФИ, 2005.1
2. Национальный ядерный центр Республики Казахстан // nnc.kz URL: ktm.nnc.kz (дата обращения: 25.05.2020).
3. Рютов Д.Д. Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках, М., 1986.
4. Ибляминова А.Д., Толстяков С.Ю. Применение болометров на основе фотодиодов для измерения радиационных потерь плазмы токамаков // Перспективы развития строительного комплекса. 2012. №Том: 1. С. 216-222.
5. Фэн Бэйюань Исследование плазмы токамака "Глобус-М" с помощью болометрической диагностики: дис.канд. физико-математических наук: 01.04.04 - Физическая электроника. Санкт-Петербург, 2003.
6. Термины радиационных и плазменных технологий: учебное пособие / В.П. Кривобоков. - Томск: Изд-во Томского Политехнического Университета, 2008 - 247 с.
7. Wesson J. Tokamaks / John Wesson, Campbell D.J.. – New York: Oxford University Press Inc., 2004.
8. Вертипорох А.Н., Лукьянов С.Ю., Максимов Ю.С. Радиационные потери на установке Т-10 // ИАЭ. 1979.
9. Schivell J., Renda G., Lowrance J. & Hsuan H. (1982). Bolometer for Measurements on High-Temperature Plasmas. Review of Scientific Instruments , Vol.53, No.10, (Oct. 1982), pp.1527-1534, ISSN 0034-6748
10. Hsuan H., Bol K. & Ellis R.A. (1975). Measurement of the Energy Balance in ATC Tokamak.Nuclear Fusion, Vol.15 (1975) pp. 657-661, ISSN 0029-5515.
11. Gray D.S., Luckhardt S.C., Chousal L., Gunner G., Kellman A.G. & Whyte D.G., (2004) Time resolved radiated power during tokamak disruptions and spectral averaging of AXUV photodiode response in DIII-D Review of Scientific Instruments Vol. 75, No. 2 (February 2004), pp. 376-381, ISSN 0034-6748.

12. Meister H., Giannone L, Horton L.D., Raupp G, Zeidner W., Grunda G., Kalvin S., Fischer U, Serikov A., Stickel S. & Reichle R. (2008) The ITER bolometer diagnostic: Status and plans Review of Scientific Instruments Vol. 79, (2008), pp. 10F511-10F516, ISSN 0034-6748.
13. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: Наука, 1977. 688 с.
14. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития. Материалы для нелинейной оптики. М.: Наука, 1975. 224 с.
15. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;
16. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.
17. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016
18. ГОСТ 12.0.003-74. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – М.: ИПК Издательство стандартов, 1992. – 4 с.;
19. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.;
20. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. – М.: Стандартинформ, 2008. – 11с.;
21. ГОСТ Р 12.1.009-2009. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения;
22. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
23. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях;
24. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016;

25. ГОСТ 12.4.120-83 Система стандартов безопасности труда. Средства коллективной защиты от ионизирующих излучений. Общие технические требования;
26. СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003;
27. ГОСТ Р ИСО 9241-5-2009. Эргономические требования к проведению офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (VDT).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Study of Radiation Losses at the KTM Tokamak

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОДМ81	Дуйсен Айдос Жаксыбайулы		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор НОЦ Б.П.Вейнберга	Янин С.Н..	д.ф-м.н		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Утягина Янина Викторовна			

Chapter 1. Study of Radiation Losses of Plasma on Tokamaks

Controlled thermonuclear fusion is the process of fusion of two light nuclei into one heavier one, with the receipt of positive energy. The main difference from traditional nuclear power is the fusion reaction. Thermonuclear power engineering has many advantages, including the absence of the production of radioactive substances that threaten nuclear safety, and a relatively low activation of structures. To carry out controlled thermonuclear fusion, 2 prerequisites must be met:

- the particle collision velocity corresponds to the plasma temperature $T > 10^8$ K;
- compliance with the Lawson criterion $n \cdot \tau > 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}$.

The most promising device for the implementation of the fusion reaction is the tokamak, the task of which is to carry out the fusion reaction with a positive energy yield. To solve this problem, it is necessary to solve a number of technological and physical problems associated with a detailed study of the energy balance [4]. However, there are channels of energy losses in the plasma energy. Research on plasma confinement in tokamaks has made it clear about the rapid loss of particles and energy in comparison with the neoclassical theory. Plasma research to improve energy retention includes:

- initiation of different modes of improved retention;
- application of additional heating;
- preparation of the wall surface, injection of particulates;
- analysis of different diaphragm and divertor configurations;
- active control of the plasma column configuration;
- optimization of discharge parameters [5].

1.1 Influence of Radiation Losses on the Confinement of the Plasma Column

Radiation loss of plasma is the phenomenon of loss of plasma energy due to its radiation, due to the presence of impurities of multiply charged ions in high-temperature plasma [6]. Radiation losses of a plasma are the power of radiation of

electromagnetic waves in the radio frequency range up to X-rays, which arise due to the acceleration of plasma particles and atomic processes.

Radiation losses are included in the energy balance equation for electrons. The radiation from the plasma filament affects the electron temperature profile. The plasma resistance η depends on the local electron temperature T_e , which determines the profile of the current density j and the stability margin q . Measurement of radiation losses makes it possible to study the behavior of impurities, the mechanism of their entry, and dynamics in plasma.

The integral energy balance in the installation is determined by the formula

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{OH} - \frac{W}{\tau_E} - P_{rad} ,$$

where P_{OH} is the power of ohmic heating, W is the energy storage in the plasma, τ_E is the energy lifetime of the plasma, and P_{rad} is the power of radiation losses [7].

It is extremely important to measure the power of radiation losses, since the share of the carried away energy is very large and amounts to 40 - 80% of the total power input. Most of the plasma is emitted in the divertor region, where it is in direct contact with the chamber walls. In this region, the electron temperature is relatively low, from 10 to 100 eV [8].

In order to reduce the radiation of the plasma column in many tokamaks, research is carried out related to improved plasma confinement or H-mode. Analyzing the data, one can understand that in the H-mode, the amount of impurities in the plasma column increases, which means that the retention of particles is dramatically improved. Also, in H-mode, the temperature of particles at the periphery is several times higher.

1.2 Measurement of Radiation Loss

Bolometers are used to register and measure radiation losses in modern tokamaks. Bolometers are devices for measuring radiation energy based on a change in the electrical resistance of a temperature-sensitive element when it is heated due

to absorption of the measured radiation flux. Table 1 lists some types of bolometers used in modern tokamaks. Also, multichannel sensors are used, with the help of which it is possible to find out the distribution of radiation losses from the plasma column, as well as to obtain data on the temporal and spatial distribution of radiation losses of the plasma.

Table 1 Types of bolometers used on tokamaks

Sensor type	Spectral resolution	Time resolution
Pyroelectric bolometer		1 ms
Photodiode	0.1 Å - 10000 Å	no worse than 10 ⁻⁴ s
Semiconductor thermistor	300 Å - 2 mm	2.5 ms
Metal bolometer	2000 Å - 0.2 nm	2-20 ms

Metal bolometer

The metal foil bolometer consists of three layers, a metal absorbent layer, a thermally conductive but electrically insulating substrate layer, and a metal resistor layer (see Figure 1).

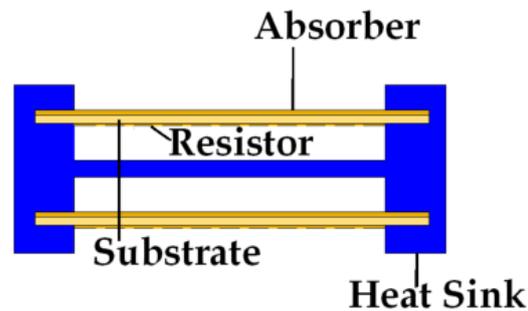


Figure 1 - Scheme of the configuration of a metal bolometer

The absorber layer absorbs the incident radiation, which causes its temperature to rise. Heat passes through the substrate layer to the resistor layer, which increases its temperature, hence the resistance. The resistor layer is made of the same metal as the absorber layer and is made in the form of a meander in order to have a high resistance of several kΩ.

The absorbent is mainly gold or platinum. The absorber layer thickness is about 3-4 μs . These metals have good sensitivity from 2000 \AA to soft X-ray radiation [9].

Thermistors

Thermistors are made of materials that have a high temperature coefficient of resistance. These include germanium and oxides of manganese, cobalt, or nickel. The absorbent element is made by sintering plates of the above materials together and mounted on an electrically insulating but thermally conductive material such as sapphire. The incident radiation raises the temperature of the thermistor and therefore decreases the resistance. Thermistors are highly sensitive and are used on Alcator A, PBX and ATC tokamaks [10].

Photodiode

Photodiode (AXUV) - detectors used for registration and control of the spatial profile of the integral radiation losses of high-temperature plasma. Types of registered radiation losses: soft X-ray, vacuum ultraviolet and visible light. AXUV - detectors are used in many modern installations, such as T-10, ADITYA, NSTX [11].

Pyroelectric Bolometer

The main sensitive element of a pyroelectric bolometer is a crystal with pyroelectric properties. Such as for example: lithium niobate, lithium tantalate. Pyroelectric crystals have polarization properties. When particles hit the surface of the pyroelectric, the temperature of the polarizing substance changes, as a result of which an instantaneous change in spontaneous polarization occurs. Further, it manifests itself in the flow of current between the absorber and the substrate. Since the current strength is very low, a voltage amplifier with a high resistance index is used. The pyroelectric bolometer is used in such tokamaks as T-15, T-10, KTM, Globus-M. The use of a pyroelectric bolometer is also planned at the ITER tokamak [12].

Chapter 2. Diagnostics of Radiation Losses of the KTM Tokamak

Diagnostics of radiation losses developed for the KTM tokamak uses a pyroelectric bolometer (see Figure 2 a) and an AXUV detector (see Figure 2 b, c). The sensitive elements are, respectively, a pyroelectric crystal [13] of lithium niobate (LiNbO_3) [14] and a photodiode. Fixed on the flange of the equatorial branch pipe of the KTM tokamak.

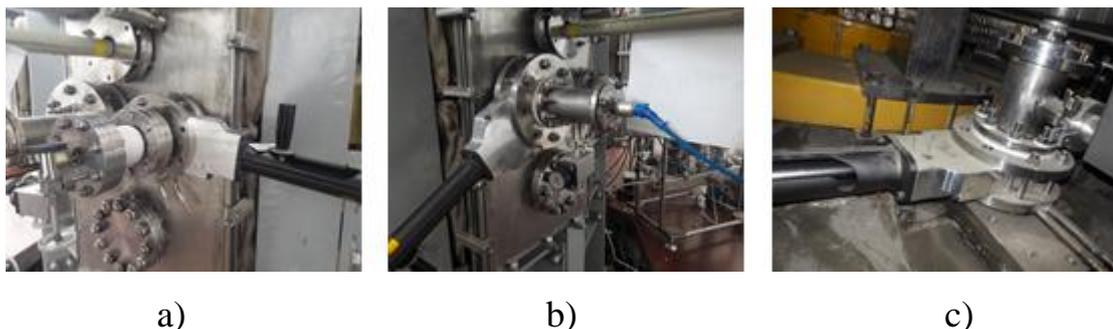


Figure 2 - External view of radiation loss diagnostics

2.1 AXUV Diagnostics

Diagnostics AXUV - designed to control the spatial profile of the integral radiation losses of high-temperature plasma. Types of registered radiation losses of plasma: vacuum ultraviolet and soft X-ray electromagnetic radiation.

The basic unit of a multichannel radiation loss monitor is a PDM built on the basis of a special silicon 32-element detector (see Figure 3) with an extremely reduced thickness of the so-called “dead layer” on the surface, which ensures its high sensitivity in the spectral region of vacuum ultraviolet radiation absorbed in the thin near-surface region of the detectors. The detector is used as a one-dimensional 16-channel array with pairwise-parallel connection of adjacent elements, and together with a 16-channel preamplifier is placed inside a vacuum pinhole camera.

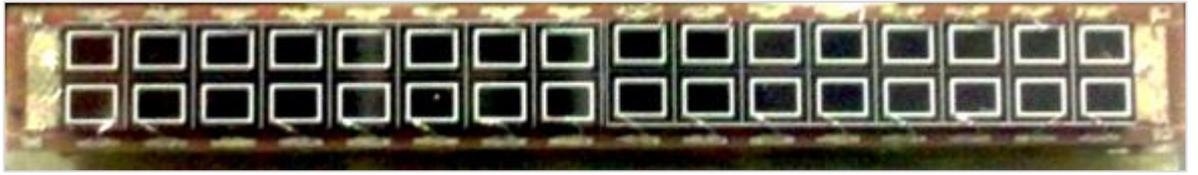


Fig. 3. Photodetector

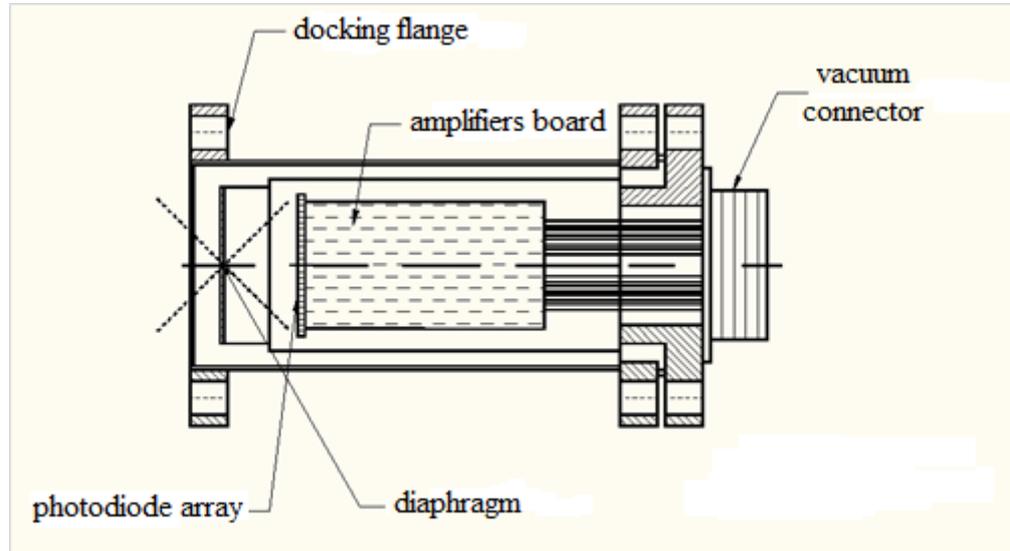
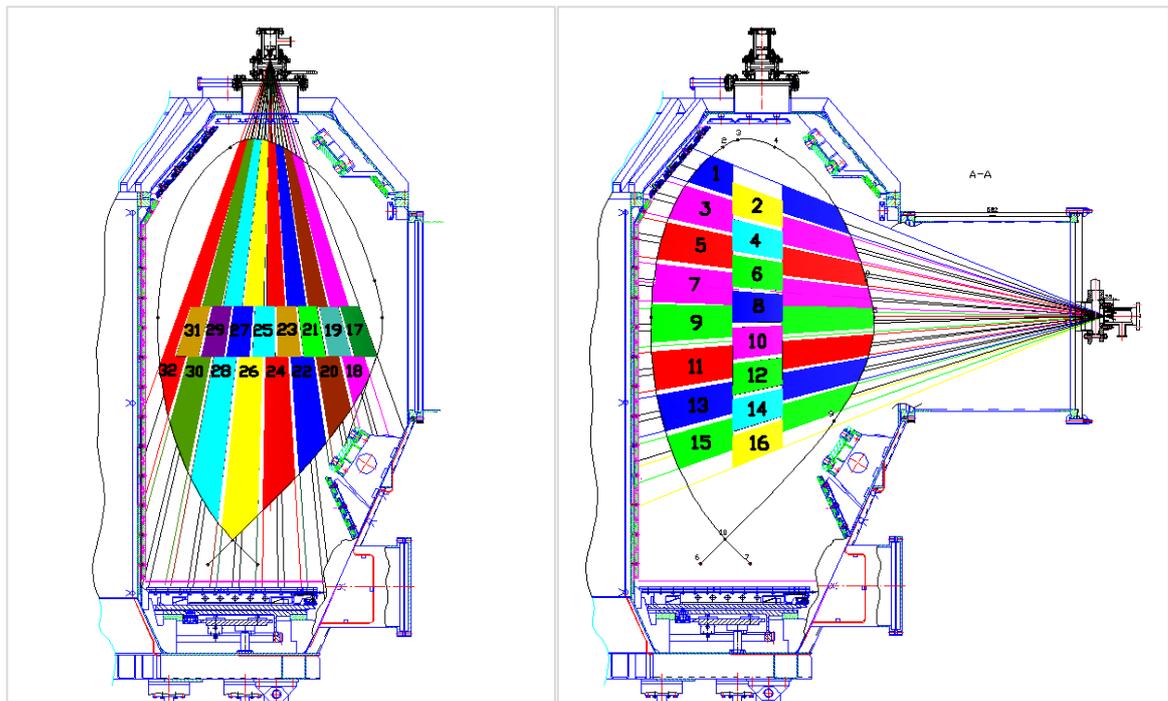


Fig. 4. A schematic section of a pinhole camera

Electromagnetic radiation of the plasma passes through a collimating diaphragm and is recorded by a detector located in the PD, the signal of which is amplified by a low-noise preamplifier, and then through the output 50-pin RSGS-50 vacuum connector to an external unit that performs the function of a scaling amplifier with auto-compensation for drift. Then the signal goes to the input of the recording device (ADC).

AXUV detectors are located in sector 8 of the KTM tokamak. Layouts and observation chords of AXUV detectors at the KTM facility are shown in Figure 5.



a) track

b) equatorial

Figure 5 - Chords of observation of AXUV-detectors

2.2 Pyroelectric Bolometer

The absorber of the pyroelectric bolometer is a lithium niobate crystal. The pyroelectric crystal is in the form of a disk 10 mm in diameter and 1 mm thick. A layer of silver with a thickness of 2-5 microns is applied to the surface of the disk.

The voltage amplifier is also a current-to-voltage converter with a constant resistance of 680 MΩ. The output signal from the amplifier goes through opto-couplers to the ADC (Analog-Digital Converter) (see Figure 6).

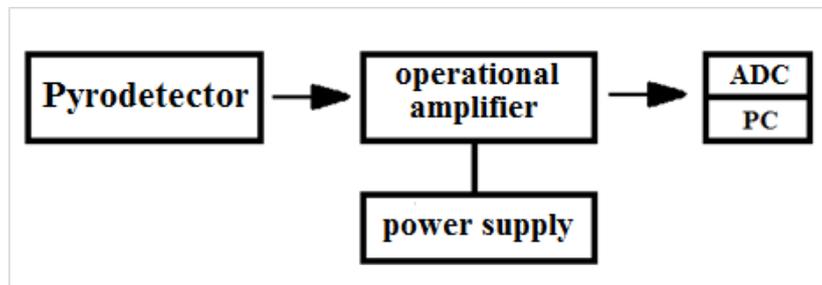


Figure 6 - Block diagram of the registration of the pyrobolometer

The pyrobolometer is located in the equatorial branch pipe of the KTM tokamak and has viewing angles in the toroidal section - 6°, in the poloidal section - 39° (see Figure 8). The pyrobolometer is located on the plug of the equatorial

branch pipe with a valve for the possibility of quick installation and dismantling of the pyrobolometer and galvanic isolation with a ceramic insulator from the potential of the vacuum chamber (see Figure 2).

The pyrobolometer is housed in a cylindrical non-magnetic steel case made of stainless steel and is shown in Figure 7.



Figure 7 - Appearance of the pyrobolometer structure

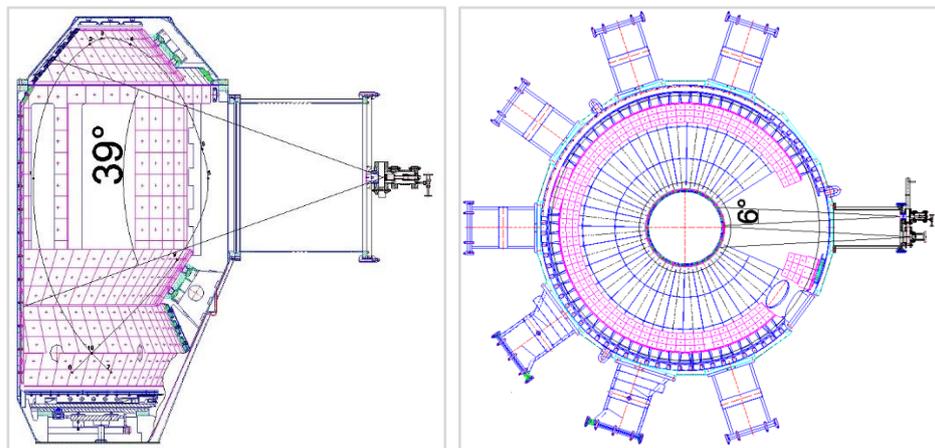


Figure 8 - Viewing angle of the pyrobolometer in the poloidal section

To reduce the influence of electromagnetic interference, the detector signal amplifier was installed in the immediate vicinity of the SE in the primary vacuum of the tokamak chamber. The operational amplifier is the LMC-6001 precision femtoampere amplifier. All necessary electrical connections are made using the RSGS-10 vacuum connector.

On the flat end of the housing cover, there is a round window that allows the flux of electromagnetic radiation and neutral particles from the tokamak plasma to pass through. The design of the pyrobolometer is such that the insulators fixing the SE, limit the heat transfer that receives radiation from the plasma, and the physical properties of the SE have practically no thermal inertia of the readings.

2.3 Algorithm for Calculating Experimental Data From a Pyrobolometer

The total radiation power of the plasma is calculated from the data obtained from a collimated detector with an observation line along the large radius of the tokamak.

The radiation power incident on the pyrodetector is calculated by the ratio of the output voltage of the pyrobolometer to the normalized coupling coefficient, which was calculated during the calibration of the pyrobolometer.

$$P_{det} = \frac{U_{out}}{k} \quad (1)$$

To switch from the voltage of the recorded signal in the ADC to the plasma radiation power, we introduce the necessary geometric factors that take into account the collimation of the incident flux, the viewing angle of the detector and, taking into account the data obtained from the calibration, we determine the relationship between the obtained voltage and the plasma radiation power.

Based on measurements along the large radius of the torus, the total radiation power of the plasma can be calculated. The power incident on the detector is equal to the product of the radiation power from a unit of toroidal length along a large radius R and a unit of a solid angle Ω by the angle of view of the detector:

$$P_{det} = \frac{P_{rad}}{2\pi R} \cdot \frac{\Delta\Omega}{4\pi R} \cdot \Delta y \quad (2)$$

Ω is the solid angle at which the receiver "sees" the plasma;

Δy - viewing angle in a toroidal section;

P_{det} is the radiation power incident on the detector;

P_{rad} is the plasma radiation power;

Viewing angle in toroidal section:

$$\Delta y = \frac{d_{det}}{a} \cdot L \quad (3)$$

The solid angle at which the receiver "sees" the plasma, taking into account the size of the collimating diaphragm, is:

$$\Delta\Omega = \Delta\alpha \cdot \Delta\beta \quad (4)$$

$\Delta\alpha$ - angular measure in a toroidal section;

$\Delta\beta$ is the angular measure in the poloidal section.

In order to find the solid angle, it is necessary to calculate the radian angular measure. Angular measure - a defining number, the value of the angle. The radian measure of the angle is the ratio of the length s of the contracting arc to the radius r . (this measure is used when describing vibrations, waves, etc.). With this in mind, we get:

$$\Delta\alpha = \frac{l_a}{L} \quad (5)$$

$$\Delta\beta = \frac{d_{det}}{L+a} \quad (6)$$

$$\Delta\Omega = \frac{l_a}{L} \cdot \frac{d_{det}}{L+a} \quad (7)$$

where l_a, d_{det} is the size of the contracting surface (length and circle)

Substituting into (2) and transforming, we obtain the following expression for the plasma radiation power:

$$P_{rad} = \frac{8\pi^2 R}{\Omega \cdot \Delta y} = \frac{8\pi^2 R}{\frac{l_a}{L} \cdot \frac{d_{det}}{L+a} \cdot \frac{d_{det}}{a} \cdot L} \cdot \frac{U}{k} = \frac{8\pi^2 R \cdot (L+a) \cdot a}{l_a \cdot d_{det}^2} \cdot \frac{U_{out}}{k} \quad (8)$$

where $d_{det} = \pi D$, D is the 'useful' diameter of the detector.